

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СКОРОСТЬ ПОЛЗУЧЕСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН И ПАРОПРОВОДОВ

Канд. техн. наук, доц. ГЕРАСИМОВА А. Г.,  
магистр техн. наук КРИКСИНА Е. Н.

*Белорусский национальный технический университет*

В современных условиях, когда значительная часть установленного энергетического оборудования отработала парковый срок службы, актуальность продления срока безопасной и надежной эксплуатации чрезвычайно высока. Проблемой продления ресурса котлов и паровых турбин серьезно начали заниматься сравнительно недавно, когда высокотемпературные элементы выработали расчетный ресурс 100 тыс. ч.

Наибольшее ограничение срока эксплуатации, обусловленное длительным воздействием высокой температуры, характерно для паропроводов и частей турбин высокого и среднего давлений. Для них характерно наличие высоконапряженных элементов, таких как арматура и изгибы трубопроводов, цельнокованные роторы турбин, рабочие лопатки и т. д. Выработка ресурса этого оборудования в первую очередь проявляется в снижении прочностных характеристик.

Длительная прочность – основная прочностная характеристика, определяющая ресурс оборудования, длительно работающего при температурах выше 450 °С. Длительная прочность – это сопротивление материалов разрушаться в условиях ползучести, которая показывает зависимость времени до разрушения от температуры или напряжения.

Паропроводы и детали турбин, работающие при температурах 535–565 °С, под воздействием постоянных во времени напряжений подвержены ползучести, которая заключается в медленном и непрерывном пластическом деформировании под воздействием постоянных во времени напряжений. В результате увеличивается диаметр и уменьшается толщина стенок труб, удлиняются лопатки и уменьшаются радиальные зазоры на периферии лопаток, наблюдается прогиб роторов.

Длительная эксплуатация в условиях ползучести приводит к накоплению в металле повреждений в виде пор и разрыхлений, которые затем сливаются в макротрещину, постепенно растущую даже в условиях постоянной нагрузки, что ограничивает время работы детали из-за исчерпания запаса длительной прочности.

Основной характеристикой ползучести является ее скорость, которую можно определить как

$$v = f(T, S, \sigma, \tau), \quad (1)$$

где  $T$  – температура;  $S$  – структурный параметр;  $\sigma$  – напряжение;  $\tau$  – время.

В зависимости от рабочей температуры  $T$  различают несколько видов ползучести. При этом температура, равная температуре рекристаллизации металла  $T_{рек}$ , является определяющей при установлении вида ползучести.

Температура рекристаллизации у чистых металлов составляет приблизительно 0,35 температуры плавления  $T_{пл}$ . Если  $T < T_{рек}$ , то проявляется логарифмическая ползучесть, которая характеризуется тем, что с течением времени скорость ползучести затухает. При температуре, превышающей  $T_{рек}$  незначительно, проявляется рекристаллизационная ползучесть, при которой скорость ползучести постоянна. Если температура значительно превышает  $T_{рек}$ , то скорость ползучести непрерывно увеличивается. В этом случае ползучесть называют диффузной [1]. Однако ползучесть не является элементарным процессом, и в суммарную пластическую деформацию металла, вызванную ползучестью, вносят вклад все три ее вида. С повышением температуры все более существенным оказывается влияние диффузной ползучести.

Так как ползучесть является термически активируемым процессом, основные параметры, характеризующие ее, можно выразить с помощью члена  $\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$ , где  $Q$  – энергия активации ползучести;  $T$  – абсолютная температура, К;  $R$  – универсальная газовая постоянная. Следовательно, температурную зависимость скорости ползучести можно описывать с помощью величины  $Q$ . Однако так как ползучесть не является элементарным процессом, определяемым единственным механизмом деформации, трудно рассчитать истинную энергию активации процесса. Поэтому экспериментально определяют кажущиеся величины энергии активации.

Рядом исследователей экспериментально установлено, что при высоких температурах энергия активации ползучести  $Q$  равна энергии активации самодиффузии металлов  $Q_{sd}$ , или теплоте разрыхления (рис. 1) [2].

Эти данные свидетельствуют о том, что ползучесть в высокотемпературной области обусловлена механизмом, зависящим от самодиффузии металлов. Последняя в металлах осуществляется путем взаимного обмена положением атомов и вакансий, поэтому можно считать, что высокотемпературная ползучесть обусловлена образованием и миграцией вакансий.

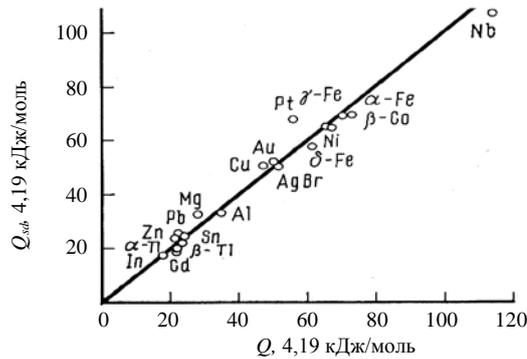


Рис. 1. Соотношение между энергией активации высокотемпературной ползучести и энергией активации самодиффузии металлов

Коэффициент самодиффузии металлов изменяется в зависимости от температуры по экспоненциальному закону [2]

$$D_{sd} = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}}, \text{ см}^2/\text{с}, \quad (2)$$

где  $D_0$  – экспериментально найденный предэкспоненциальный множитель, зависящий от связи между атомами,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $R = 8,314 \text{ кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$ .

Коэффициент самодиффузии стали можно приближенно определить, рассматривая ее как многокомпонентный сплав железа с легирующими элементами, по формуле [3]:

$$D_{sd} = \frac{1 - x_1}{\frac{x_2}{D_{sd12}} + \frac{x_3}{D_{sd13}} + \frac{x_4}{D_{sd14}} + \dots + \frac{x_n}{D_{sd1n}}}, \quad (3)$$

где  $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$  – процентное содержание компонентов сплава;  $D_{sd12}, D_{sd13}, D_{sd14}, \dots, D_{sd1n}$  – коэффициент самодиффузии компонента 1 в смеси с компонентом 2, в смеси с компонентом 3 и т. д.

В табл. 1 приведены содержание энергии активации самодиффузии  $Q_{sd}$  и предэкспоненциального множителя  $D_0$ , а также процентное содержание основных компонентов, входящих в состав некоторых жаропрочных сталей, которые применяются при изготовлении высокотемпературных паропроводов, рабочих лопаток и роторов турбин.

Таблица 1

Показатель \ металл	W	V	Cu	Mo	Ni	Cr
$Q_{sd}$ , кДж/моль	142	90	48	114	60	85
$D_0$ , $\text{см}^2/\text{с}$	11,0	1,5	0,3	4,0	1,0	45,0
Паропроводы						
12X1M1Ф	–	0,15–0,3	0,2	0,25–0,35	0,3	0,9–1,2
15X1M1Ф	–	0,2–0,25	0,25	0,9–1,1	0,25	1,1–1,4
Рабочие лопатки						
15X11MФ	–	0,25–0,4	0,3	0,6–0,8	0,6	10–11,5
20X12ВНМФ	0,7–0,11	0,15–0,3	0,3	0,5–0,7	0,5–0,9	10,5–12,5
Роторы						
P2MA (25X1M1Ф)	–	0,22–0,32	0,25	0,9–1,05	0,4	1,5–1,8
ЭИ-415 (20X3МНФ)	0,22–0,32	0,6–0,85	0,2	0,35–0,55	0,3	2,8–3,3

На рис. 2 и 3 представлены расчетные зависимости коэффициентов самодиффузии рассматриваемых нами сталей.

Анализ представленных диаграмм подтверждает, что температура имеет определяющее значение при диффузной ползучести.

В состав сталей, применяемых при высоких температурах, обычно входят такие тугоплавкие металлы, как Cr, Ni, Mo и W, наличие которых в составе сплавов является одной из причин, обуславливающих снижение коэффициента самодиффузии  $D_{sd}$ . Наиболее эффективно увеличивает сопротивление ползучести молибден, что и определяет обязательное легирование жаропрочных сталей этим элементом. Но влияние ползучести настолько велико, что даже для жаропрочных сталей при высоких температурах нельзя допускать значительных нагрузок.

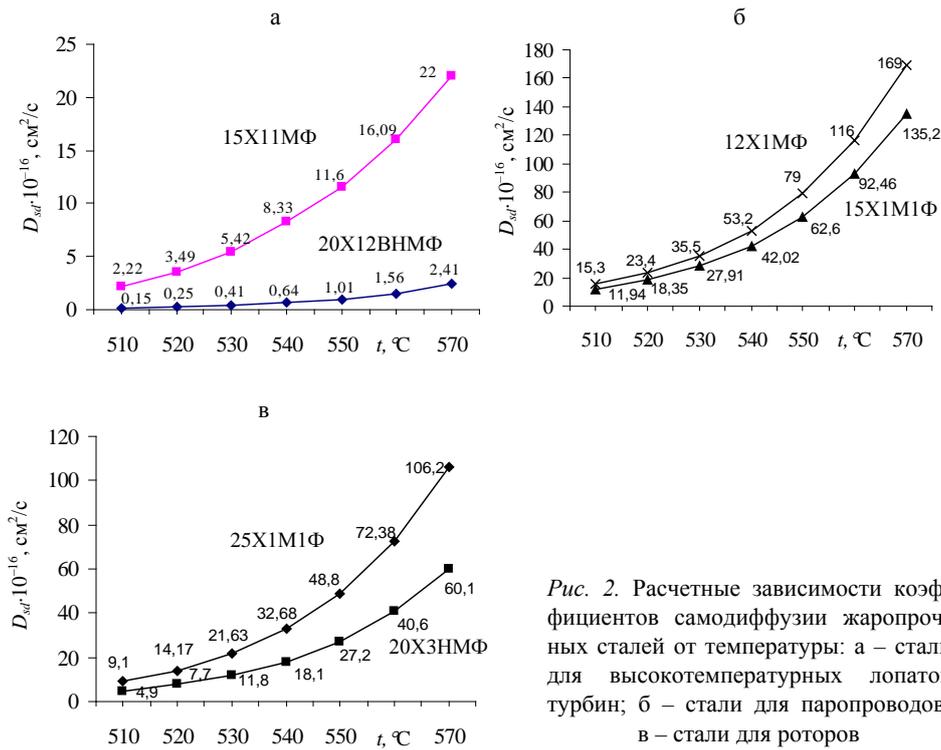


Рис. 2. Расчетные зависимости коэффициентов самодиффузии жаропрочных сталей от температуры: а – стали для высокотемпературных лопаток турбин; б – стали для паропроводов; в – стали для роторов

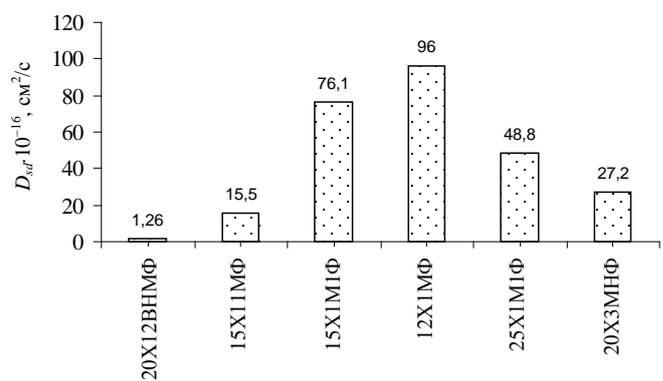


Рис. 3. Коэффициенты самодиффузии сталей паропроводов, лопаток и роторов при температуре 555 °C

Наибольшее влияние на скорость высокотемпературной ползучести оказывает размер зерна.

По современным представлениям, разрушение металла в процессе ползучести идет постепенно. Повреждения накапливаются в металле, и в результате появляются новые поры и идет рост уже образовавшихся.

При высоких температурах в результате диффузии атомов на поверхности пор происходит их перемещение. Поры сливаются, образуя микротрещины. Последние, разрастаясь и объединяясь, превращаются в макротрещины, которые ослабляют металл настолько, что происходит его разрушение из-за исчерпания запаса длительной прочности.

Зарождение пор может происходить и в теле самого зерна, и по границам зерен. Первые поры обычно появляются на границах зерен, расположенных перпендикулярно максимальным нормальным растягивающим напряжениям. Скорость диффузии по границам зерен значительно превышает скорость диффузии в теле зерна. Установлено, что коэффициент самодиффузии  $D_{sd}$  по границам зерен обычно на два порядка выше, чем в теле зерна [3]. Следовательно, для исследуемых нами сталей он составляет порядка  $10^{-14}$  см<sup>2</sup>/с. Это связано с меньшими значениями энергии активации  $Q$ , что указывает на ослабление энергии связи атомов по границам по сравнению с телом зерна. По этим границам в дальнейшем происходят наиболее интенсивный рост пор за счет их слияния и диффузии из тела зерна и дальнейшее перерастание их в трещины. Установлено, например, что в результате длительной эксплуатации в металле паропроводных труб по границам зерен количество пор достигает  $10^3$ – $10^5$  мм<sup>-2</sup>, а их размер изменяется от 0,05 до 8 мкм [4].

## ВЫВОДЫ

1. Для энергетического оборудования применение крупнозернистых сталей способствует уменьшению протяженности границ зерен и снижает ползучесть. В идеале структура сталей, работающих при высоких температурах, не должна иметь границ зерен и состоять из одного монокристалла. Такая структура получена для ряда турбинных лопаток ответственного назначения [5].

2. Имея представленные выше зависимости  $D_{sd} = f(t)$ , учитывая размер зерна и время выхода пор на границу зерен, можно более точно оценить ресурсные характеристики применяемых сталей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. М а т ю н и н, В. М. Металловедение в теплоэнергетике: учеб. пособие для вузов / В. М. Матюнин. – М.: МЭИ, 2008. – 328 с.
2. Т а й р а, С. Теория высокотемпературной прочности материалов / С. Тайра, Р. Отани; пер. с яп. – М.: Металлургия, 1986. – 280 с.
3. Х и м у ш и н, Ф. Ф. Легирование, термическая обработка и свойства жаропрочных сталей и сплавов / Ф. Ф. Химушин. – М.: Оборонгиз, 1972. – 335 с.
4. А н т и к а й н, П. А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов / П. А. Антикайн. – 4-е изд. – М.: Энергоиздат, 2001. – 440 с.
5. С о л н ц е в, Ю. П. Материаловедение: учеб. / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин, Ф. Войкут. – М.: МИСИС, 1999. – 600 с.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 17.03.2011